第 41 卷　第 2 期　　天 文 学 进 展　　Vol. 41,　No. 2
2023 年 6 月　　PROGRESS IN ASTRONOMY　　Jun., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.02.01

恒星形成星系主序关系的研究现状

陈瑶鑫[1]，康　熙[1,2]

(1. 浙江大学　物理学院天文研究所，杭州　310027；　2. 中国科学院　紫金山天文台，南京　210034)

摘要： 观测发现，恒星形成星系 (star-forming galaxies, SFGs) 的恒星形成率 ($\psi_{\rm SFR}$) 与恒星质量 (M_*) 之间存在紧密的相关关系 (即 lg $\psi_{\rm SFR}$ − lg M_*，称为“主序关系”)，弥散约为 $0.2 \sim 0.4$ dex。主序关系对限制星系演化的理论模型具有重要的意义，是描述星系演化的基本关系之一。近年来，随着大型观测设备和数据处理技术飞速发展，星系形成和演化的理论模型也越来越完善，在此基础上，天文学家对于主序关系的研究取得了许多重要进展。首先介绍测量星系 $\psi_{\rm SFR}$ 的技术和挑选 SFGs 的方法，方便后续分析主序关系存在系统性偏差的原因。然后介绍主序关系最新的观测进展：主序关系在大质量端会“变平”，可能是由于星系/暗晕冷热吸积模式发生转换导致冷吸积减少；主序关系的弥散对恒星质量的依赖呈现 U 型，可能是由于小质量端的恒星反馈和大质量端的活动星系核反馈导致恒星质量相近的星系在恒星形成历史上具有多样性；理论与观测得到的主序关系零点在中高红移存在差异的问题依然存在较大争议。最后对主序关系的研究进行了总结和展望。

关　键　词： 恒星形成星系；主序关系；星系形成；星系演化

中图分类号： P152.1　　**文献标识码：** A

1　引　言

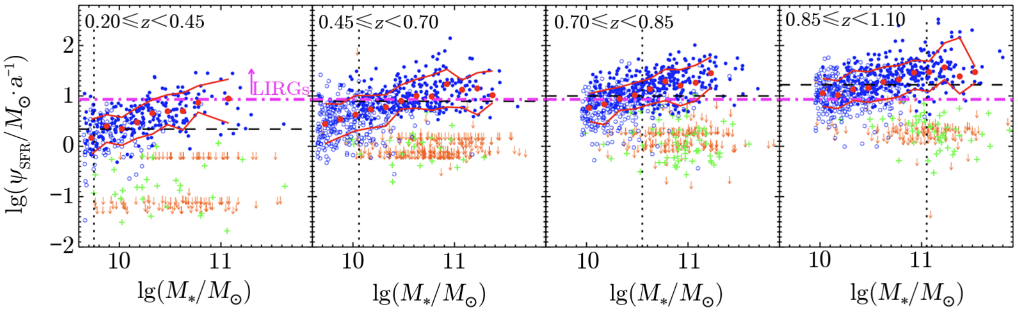
2007 年 Noeske 等人[1]利用 AEGIS 的巡天数据发现，对于 $0.2 \leqslant z < 1.1$ 的恒星形成星系 (star-forming galaxies, SFGs)，其恒星形成率 ($\psi_{\rm SFR}$) 与恒星质量 (M_*) 紧密相关，被称为“主序关系”，见图 1。自此之后，主序关系得到广泛的关注，并且随着观测设备和数据分析技术的发展，恒星形成星系主序关系的测量结果也越来越准确[2−24]。

目前流行的理论认为，星系形成是由多个复杂物理过程协同作用的，例如激波加热、气体冷却、恒星形成、恒星反馈等。正确理解这些过程在星系形成中扮演的角色是当前星系天文学的重要课题。而主序关系可以对现有的星系形成理论模型的参数加以限制，从而帮助我

收稿日期： 2022-05-31；　**修回日期：** 2022-10-17

资助项目： 国家重点研发计划 (2022YFA1602903)；国家自然科学基金 (11825303, 11861131006)；中央高校基本科研业务费专项资金资助 (226-2022-00216)

通讯作者： 陈瑶鑫，chenyaoxin@zju.edu.cn



注：蓝色的点代表 SFGs 的观测结果 (包括实心点和空心点)，红色的圆点代表不同质量区间对 SFGs 的 $\psi_{\rm SFR}$ 中位数的统计结果，红色的两条线包括了 SFGs 的 68%($\pm\sigma$) 的数据。竖直的黑色点线代表了样本完备度 $>95\%$ 对应的恒星质量；水平的黑色虚线代表了由 24 μm 数据得到样本完备度达到 80% 对应的 $\psi_{\rm SFR}$；水平的紫色点划线代表了 $\psi_{\rm SFR}$ 在此线之上的 24 μm 得到的星系为 Luminous Infrared Galaxies (LIRGs)。

图 1　不同红移处的主序关系[1]

们理解星系形成过程。近年来通过天文学家的不懈努力，对下列问题取得了一些进展：主序关系在大质量端是否会“变平” (即大小质量端的斜率不同) 以及其背后的物理机制是什么？主序关系的弥散有何特征以及弥散的产生原因是什么？观测和星系形成演化的理论模型得到的主序关系总是存在系统性偏差的原因为何？主序关系如何被用来限制星系的恒星形成历史，进而对星系形成和演化的物理过程加以约束呢？本文致力于总结最新的主序关系研究成果，并介绍涉及上述问题的研究进展。

2015 年，高宇翔等人[25]发表了一篇关于恒星形成星系主序关系的综述文章 (下文简称为高 15)，重点从观测的角度详细地讨论了主序关系的测量结果和误差分析，以及主序关系对星系形成与演化理论的限制。2015 年以来，主序关系的研究又取得了一些新的成果：早期存在的关于主序关系斜率的争议已经基本解决，目前普遍认为主序关系在大质量端会“变平”，并给出相对合理的理论解释；另外关于主序关系弥散对恒星质量是否依赖有了新的认识。本文着重介绍了这些新进展，并且更加侧重对理论解释的阐述。

本文第 2 章重点介绍测量 $\psi_{\rm SFR}$ 的方法和挑选 SFGs 的方法。第 3 章讨论了主序关系的最新测量结果以及主序关系相关问题的理论分析。第 4 章对目前主序关系的研究工作进行总结，并对未来主序关系的进一步研究进行展望。

2　测定恒星形成星系主序关系

简单来说，从观测数据中得到主序关系的步骤如下：首先将原始数据进行分析计算并得到星系样本的 $\psi_{\rm SFR}$ 和 M_*，然后从总的星系样本挑选出 SFGs，从而得出主序关系。在主序关系的测定中，确定星系 $\psi_{\rm SFR}$ 和挑选 SFGs 的过程对结果影响比较大[11, 26]。在这些过程中，使用不同的方法会引入系统性的差异，会导致最终得到的主序关系有所不同，影响对主序关系的理解和探究。

2.1　测量星系恒星形成率的方法

观测上估算星系整体的 $\psi_{\rm SFR}$ 需要利用星系的光谱，常用的 $\psi_{\rm SFR}$ 探针包括以下几种[27]。

(1) Hα 发射线——最传统的方法[2, 13]

年轻的大质量恒星产生大量电离光子，电离周围的气体。氢原子在从高能级向低能级跃迁的过程中产生发射线，包括著名的巴耳末线系中的 Hα 发射线 (0.656 μm)。Hα 发射线的强度与电离光子率的关系由 Osterbrock 和 Ferland[28] 在 2006 年的著作中给出。当初始质量函数 (initial mass function, IMF) 给定时，电离光子率与 $\psi_{\rm SFR}$ 的关系也可由相关文献给出，故而可以通过 Hα 发射线计算得到 $\psi_{\rm SFR}$。由于 Hα 发射线很强且在光学波段，所以 Hα 发射线是最传统的恒星形成率探针。但是利用 Hα 发射线确定 $\psi_{\rm SFR}$ 的方法对尘埃的影响很敏感，电离光子可能会被尘埃吸收，而无法电离氢原子，进而无法产生 Hα 发射线，使得到的 $\psi_{\rm SFR}$ 偏低。Hα 发射线追踪了过去 10 Ma 内形成的恒星。

(2) 紫外波段 (ultraviolet, UV)——最直接的方法[3]

年轻的大质量恒星 (主要是 O、B 型恒星) 在紫外波段 (UV) 的辐射很强，在给定的 IMF 下，UV 波段的辐射可以转化为星系的 $\psi_{\rm SFR}$，故而 UV 波段的辐射是测量星系恒星形成率最直接的探针。但是这种方法同样很容易受星际尘埃的影响，尘埃的存在会吸收 UV 波段的光，会低估 $\psi_{\rm SFR}$，因此须考虑尘埃消光来进行修正。这种方法追踪了过去 $10 \sim 200$ Ma 期间形成的恒星。

(3) 红外波段 (infrared, IR)[5, 10]

在年轻的大质量恒星产生很强的 UV 辐射之后，星际尘埃会在 UV 波段进行吸收，在红外波段 (IR) 进行辐射，那么通过对 IR 波段的观测可以推知星系的 $\psi_{\rm SFR}$。但不是所有的 UV 都会被尘埃所吸收，这个吸收比例很大程度上取决于星系本身的尘埃含量和分布，所以如何确定吸收比例是此方法测量 $\psi_{\rm SFR}$ 面临的难题。如果假设所有的 UV 都被吸收然后在 IR 进行辐射，那么由此得到的 $\psi_{\rm SFR}$ 将比实际偏低，只给出实际 $\psi_{\rm SFR}$ 的下限。这种方法追踪了过去 $0 \sim 100$ Ma 期间形成的恒星。

(4) 多波段测量的结合 (如 UV+IR、Hα+IR) ——目前最常用的方法[12, 14–16, 21]

从上述的几种方法可以看出，如果要准确地给出星系的 $\psi_{\rm SFR}$，不仅要考虑被星际尘埃影响的部分还要考虑不受尘埃影响的部分，故而近年来越来越多的研究会综合上述几种探针来进行研究[12, 14–16, 21]。通常使用的方法是紫外波段和红外波段的结合 (UV+IR)，Hα 发射线和红外波段的结合 (Hα+IR)，这样的结合可以让最终测量的 $\psi_{\rm SFR}$ 更加准确。Lutz[29] 在对于远红外的综述中也认为 far-IR 和 UV 的结合是目前决定星系 $\psi_{\rm SFR}$ 最有效的方法。

(5) 其他方法

X 射线和射电波段的观测也可以用来测量 $\psi_{\rm SFR}$，但是不如上面几种方法常用，这里不再详细介绍。还有利用 SED-fitting 来确定 $\psi_{\rm SFR}$ 的研究工作[17, 18]，此方法需要结合星族合成模型 (如 BC03[30]) 与给定形式的恒星形成历史。

2.2 挑选恒星形成星系的方法

挑选出 SFGs 进而得到主序关系的过程就是定义主序关系的过程，下面将介绍恒星形成星系主序关系的几种定义方法。

(1) 观测上最常利用颜色来选取 SFGs，如 Lyman-break 技术、B-z 与 z-K (sBzK 图方法[31])[3, 10]、U-V 与 V-J (UVJ 图)[8, 12, 14, 16, 19]、NUV-r 与 r-J (NUVrJ 图)[7, 15]。这些方法的基本原理在高宇翔等人[25] (简称高 15) 2015 年发表的综述中有详细且准确的描述。

(2) 利用设置比恒星形成率 (specific star formation rate, sSFR) 的阈值来区分 SFGs 和宁静星系 (quenched galaxies, QGs)，高于此阈值的星系为 SFGs，其余星系为 QGs。设置的阈值应随着红移不同而发生变化，在实际操作中应该注意。

(3) 2σ-clipping 方法：给定一个主序关系的目标函数形式，不断迭代去除不在目标拟合 $\pm2\sigma$ 之内的星系样本。Santini 等人[4, 18]在 2009 年和 2017 年的工作都采用了此方法生成主序关系。

(4) 除了上述几种比较传统的方法，近些年还有一些新颖的方法来定义主序关系。如 Renzini 和 Peng[13]利用星系样本在 $N_{\rm g}$-lg $\psi_{\rm SFR}$-lg M_* 的三维坐标中的双峰曲面函数的其中一条 $\psi_{\rm SFR}$ 较大的脊线来确定主序关系 (其中 $N_{\rm g}$ 为星系数目)。又如在 Sherman 等人[22]2021 年的工作中，利用了不同质量区间星系的 sSFR 的星系数目分布来确定 SFGs。这些新方法一般都需要大量星系样本数据作支撑，只有数据量足够大才可以做类似的统计研究。

3 恒星形成星系主序关系

恒星形成星系主序关系的描述至少需要斜率、弥散和零点三个基本参数，故主序关系的相关问题也基本围绕这三个参数展开。本章首先简单地总结对主序关系的早期认识，然后从四个角度出发阐述主序关系的最新进展：主序关系在大质量端的“变平”现象及背后机制；主序关系的弥散研究；理论与观测的零点存在系统性偏差及产生此现象的原因讨论；观测结果的统一校正。

3.1 主序关系的早期认识

两个重要的总结性工作基本可以代表 2015 年之前的天文学家对恒星形成星系主序关系的基本认识。

高 15 总结了 2015 年之前近 10 年的对 $0 \leqslant z \leqslant 7$ 范围内的主序关系的测量结果。他们总结发现主序关系的斜率范围约为 $0.6 \sim 1.0$，红移越低的主序关系斜率越小，且大小质量端的斜率不同；发现随着红移的升高，主序关系的零点 ($10^{10} M_\odot$) 一直在增加，在红移 $0 \sim 2$ 范围的增加尤为明显；主序关系具有一定程度的弥散 (0.3 dex)，随红移变化不明显。

Speagle 等人[11]在 2014 年 (简称 S14) 将 2007 年之后发表的 25 篇主序关系观测文章中的 64 个观测结果 (红移范围 $z \simeq 0 \sim 6$) 校准到统一的标度下，然后对校准后的数据进行了拟合，得到了当时主序关系的最佳拟合公式。他们的目的是直接比较不同主序关系的观测结果，进而得到较为真实的主序关系及其演化。他们不仅比较精确地决定了主序关系的演

化，还量化了不同的选择对主序关系的影响程度。他们发现对主序关系的确定造成主要影响 ($\gtrsim 25\%$) 的因素有：恒星初始质量函数的选择，$\psi_{\rm SFR}$ 探针的选取，星族合成模型的选择，恒星形成历史的选择，尘埃衰减，消光曲线的选择等。还有一个重要因素是挑选 SFGs 的方法。考虑到众多因素的影响，并对其中部分因素进行了统一化标度处理 (还有一部分影响因素很难具体量化其对确定 $\psi_{\rm SFR}$ 和 M_* 的精确影响，故而未校准)，得到了当时最佳的 MS 拟合公式：

$$\begin{aligned}\lg\psi_{\rm SFR} =&[(0.84\pm0.02)-(0.026\pm0.003)\times t]\lg M_*+\\&[(6.51\pm0.24)-(0.11\pm0.03)\times t]\quad,\end{aligned}\tag{1}$$

其中，t 是宇宙年龄，单位为 Ga。质量范围是 $\lg M_*=9.7\sim11.1$，红移范围是 $0\sim6$。在考虑 $\psi_{\rm SFR}$ 探针的内在弥散之后，他们发现主序关系真正的弥散约为 0.2 dex，而不是之前认为的 0.3 dex。

3.2　主序关系最新进展

3.2.1　主序关系的斜率

近几年来，恒星形成星系主序关系在大质量端的斜率变化以及背后的机制是大家一直探讨的话题。一些研究认为主序关系就是一个幂律关系 ($\lg\psi_{\rm SFR}\propto\alpha\lg M_*$)，在对数空间的斜率不随星系的恒星质量发生变化 (在低红移[6, 13]和高红移[10, 11, 19])。但是还有一些研究发现主序关系并不是简单的幂律关系，在小质量端，对数空间的斜率基本不变，但是星系恒星质量超过一定的特征质量 M_0 之后，斜率变小[12, 14–16, 20, 21, 24] (也称主序关系在大质量端变平/出现弯曲)。

Whitaker 等人[12]在 2014 年发现，在红移范围为 $0.5\sim2$ 时，主序关系的斜率依赖于恒星质量，在小质量端更陡 ($\lg\psi_{\rm SFR}\propto\lg M_*$)，而在大质量端比较平坦 ($\lg\psi_{\rm SFR}\propto(0.3\sim0.6)\lg M_*$)；Schreiber 等人[14]在 2015 年也发现对大质量的星系 ($M_*\geqslant10^{10.5}M_\odot$)，主序关系变平了，并且他们发现这种现象在低红移表现得更加明显。Lee 等人[15]在 2015 年针对此类现象引入了新的拟合形式来对主序关系进行拟合，见如下公式：

$$\psi_{\rm SFR}(M_*)=\psi_{\rm max}/(1+(M_*/M_0)^{-\gamma})\quad,\tag{2}$$

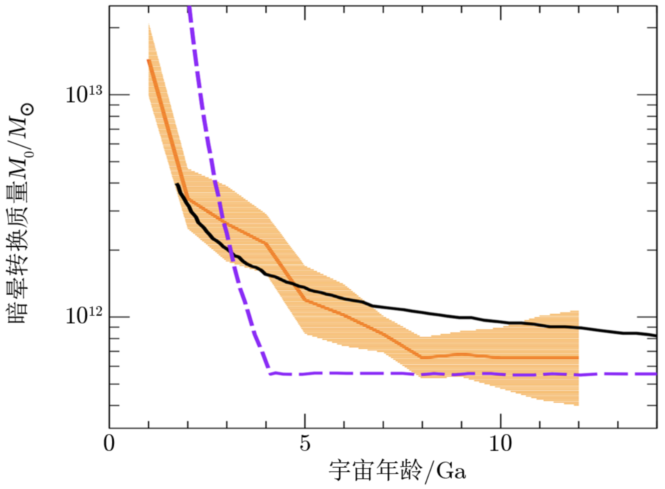
其中，γ 代表小质量端的幂律关系的斜率，M_0 代表转换质量，$\psi_{\rm max}$ 代表该函数在大恒星质量处渐近逼近的 $\psi_{\rm SFR}$ 的值。此种拟合公式的各项自由参数更加具有物理意义，可以用来描述主序关系中的重要特征。对数据拟合之后他们发现，在不同红移处，转换质量 M_0 在 $10^{10}M_\odot$ 附近 ($10^{9.8}\sim10^{10.3}M_\odot$)，这与 Tomczak 等人[16]得到的 M_0 相符合。Popesso 等人[20, 21, 24]最近的多个工作同样观测到主序关系在大质量端出现弯曲现象。

对于此现象的出现机制，也有很多工作从不同角度出发进行探讨。目前对于主序关系在大质量端的弯曲现象主要有三个方面的解释，分别是星系形态学的解释[14, 32, 33]，暗晕吸积模式转化的解释[20, 24, 34]，以及挑选 SFGs 方法不同的解释[21, 23, 35]。

一些研究认为主序关系在大质量端的变平现象是由于 SFGs 中的核球比例随着星系 M_* 的变大而变大，而核球中的恒星大部分是比较老的恒星，对恒星形成没有贡献，导致 sSFR

的降低。Abramson 等人[32]对来自 SDSS 的数据进行了核盘分离并得到对应于盘的比恒星形成率 ($\psi_{\rm SFR}/M_{\rm disk}$)，通过对 $M_* \geqslant 10^{10} M_\odot$ 和核球比 $B/T \lesssim 0.6$ 的近邻宇宙星系样本进行拟合发现，这样的处理增加了大质量星系 ($M_* \geqslant 10^{10} M_\odot$) 的 sSFR，可以在一定程度上缓解主序关系在大质量端的斜率变平现象。这种解释也被 Schreiber 等人[14]所认同。Whitaker 等人[33]在 2015 年引入新的间接反映核球占比的量 (Sersic indices) n 来探究形态对星系 sSFR 的影响。他们发现，对于 $n > 2$ (意味着核球占比更大) 的星系要比主序关系的 sSFR 低。他们还发现，对于高红移 $z \simeq 2$ 的星系，主序关系的斜率对于 n 的依赖较弱；对于 $z < 1$ 的星系，主序关系的斜率对于 n 的依赖很强。这可能意味着 $z \simeq 2$ 的星系正在迅速增长核球，此时星系中央的恒星还非常年轻，但是在 $z < 1$ 时，核球中的恒星很老，导致主序关系的斜率在大质量端大幅下降。

然而一些研究认为 SFGs 中核球的增长并不是主序关系斜率变平的主要原因。Schreiber 等人[36] 在 2016 年利用 HST 在 CANDELS 视场的近红外高分辨率的图像，对遥远星系做了仔细的核盘分解，首次得到了 $z = 1$ 的 $\lg \psi_{\rm SFR}$-$\lg M_{\rm disk}$ 关系，发现在大质量端的斜率依然存在变平的现象 (见该文章中的图 8)，故而认为至少在 $z = 1$ 处，SFGs 中核球的增长并不是导致主序关系在大质量端斜率出现变化的主要原因。另外他们通过对恒星形成效率 ($\eta_{\rm SFE} = \psi_{\rm SFR}/M_{\rm gas}$，$M_{\rm gas}$ 是星系中可以生成恒星的气体质量) 与 M_* 关系的研究发现，$\eta_{\rm SFE}$ 对于 M_* 的依赖可以解释主序关系在大质量端的斜率变化，即大质量星系的 $M_{\rm gas}$ 并未大幅减少，所以 $\psi_{\rm SFR}$ 的降低主要是由大质量星系的$\eta_{\rm SFE}$降低导致的。Popesso 等人[20]在 2019 年的一个工作认为主序关系大质量端的弯曲是由于两个过程导致的：一个是核球组分的增长，该工作认为核球的增长主要是由频繁的并合活动导致的，但单纯靠核球的增长不足以解释大质量端的斜率变平现象；另一个是星系盘上 $\psi_{\rm SFR}$ 的降低，这主要是因为热的暗晕环境导致的冷气体的匮乏，又因为主序关系斜率发生变化的恒星质量 ($M_* \simeq 10^{10.5} M_\odot$) 对应的所在暗晕质量 ($M_h \simeq 10^{12\sim12.5} M_\odot$) 是冷吸积模式和热吸积模式的临界暗晕质量，所以认为主序关系斜率的变化可能与两种吸积模式的转变有关，最近的两个工作验证了这个猜想。Daddi 等人[34]利用了公式 (2) 对两个不同的观测结果[15, 37]进行拟合，得到了随红移变化的转换质量 M_0，在 $0 < z < 1$ 时，$M_0 \simeq 10^{10} M_\odot$；在 $z = 2$ 时 M_0 提升到 $= 10^{11} M_\odot$ 左右；在更高的红移处保持缓慢增长或者不变。如果把 M_0 通过 stellar mass-halo mass relation (SHMR) 转换成所在的暗晕质量，发现这个转换质量与理论模型中得到的冷吸积模式和热吸积模式的临界暗晕质量的行为保持一致 (同时，Daddi 等人[38]在 2022 年找到了冷热吸积模式转化的观测证据)。故而认为，恒星形成星系主序关系在大质量端的斜率变平现象由冷吸积的减少使可用来生成恒星的冷气体的减少所致。该工作同时也探究了星系的形态 (核球比，B/T) 的影响，发现主序关系上即使是大于 M_0 的星系中的大部分星系都是盘主导 ($B/T < 0.4$) 的。Popesso 等人[24]在 2022 年的工作同样将得到的转换质量 M_0 对应到暗晕质量之后，发现随红移的变化行为与理论模型中给出的冷热吸积模式转化质量的行为基本一致 (见图 2)，所以认为主序关系大质量端斜率变小是由于进入暗晕的气体是通过热吸积的模式，冷气体的量减少了，所以大质量星系的 $\psi_{\rm SFR}$ 降低了，主序关系出现了大质量端的“弯曲”效应。



注：橘色的线代表主序关系的转换质量 M_0 所对应的暗晕质量随时间的演化；黑色的线是 Behroozi 等人[39]得到的超过 50% 的星系为 QG 的暗晕质量随时间的演化；紫色的线是 Dekel 和 Birnboim[40]在 2006 年得到的冷吸积模式和热吸积模式的临界暗晕质量随时间的演化。

图 2　主序关系转换质量 M_0 对应的暗晕质量随时间的演化[24]

也有一些研究发现主序关系大质量端的形状依赖于挑选 SFGs 的方法。Donnari 等人[35]在 2019 年的工作中利用 IllustrisTNG 流体模拟的星系样本 ($M_* > 10^9 M_\odot$, $0 \leqslant z \leqslant 2$) 对主序关系进行研究，发现如果用 UVJ 双色图上的分界线去区分 SFGs 和 QG，那么得到的主序关系在大质量端将会向下弯曲，这说明用此类方法挑选的恒星形成星系与其他方法得到的相比有较低的 $\psi_{\rm SFR}$。Leja 等人[23]在 2021 年利用最新的观测 (COSMOS-2015 和 3D-HST) 得到主序关系，发现不同的筛选恒星形成星系的方法会导致主序关系在大质量端的斜率各有不同，即挑选星系的方法会影响主序关系在大质量端的斜率。Popesso 等人[21]也提到 SFGs 的挑选方法会影响主序关系在大质量端的斜率。

3.2.2　主序关系的弥散

主序关系的本征弥散反映了具有相似恒星质量的星系在恒星形成历史上的差异，所以对主序关系弥散的研究有利于更好地认识星系的形成与演化过程。然而，不同研究得到的结果一直存在较大差异，尤其是弥散对于恒星质量的依赖，即 $\sigma_{\rm SFR}$-M_*。

一些研究认为主序关系的弥散在不同的恒星质量区间是一个常数。例如，Rodighiero 等人[41]和 Schreiber 等人[14]利用 UV 探针得到的 $\psi_{\rm SFR}$，发现对于 $z \simeq 2$，恒星质量范围为 $(10^9 \sim 10^{10}) M_\odot$ 的 SFGs 来说 $\sigma_{\rm SFR}$ 是常数 (约 0.3 dex)，独立于 M_*。然而有的研究发现，对于更大的恒星质量，主序关系的弥散变大，如 Guo 等人[42]利用来自 COSMOS 的 12 641 个 SFGs (大于 $10^{9.5} M_\odot, 0.6 < z < 0.8$)，发现 $M_* > 10^{10.5} M_\odot$ 时，主序关系的弥散变大。还有一些研究发现，对于星系恒星质量越小，主序关系的弥散越大，如 Santini 等人[18]和 Boogaard 等人[43]的工作。

最新的一些研究表明，$\sigma_{\rm SFR}$-M_* 可能是一个 U 型曲线，即在小质量端和大质量端主序

关系的弥散都会变大。Willett 等人[44]在 2015 年利用 Galaxy Zoo 巡天 ($z < 0.085$)，发现随着星系质量由 $10^8 M_\odot$ 到 $10^{10} M_\odot$，再到 $10^{11.5} M_\odot$，主序关系的弥散由 0.45 dex 到 0.35 dex，再到约 0.5 dex。Davies 等人[45]在 2022 年利用 DEVILS 巡天的数据发现，对于 $0.1 < z < 0.7$ 的中等质量的星系，$\sigma_{\rm SFR}$-M_* 呈现了 U 型，并发现最小弥散对应的恒星质量可能与主序关系斜率变平的转换质量 M_0 有关。

不同观测工作得到的与弥散相关的结果差异较大，是完全可以理解的。首先，不同观测对应的红移区间是不同的；除此之外，测定主序关系过程中，确定 $\psi_{\rm SFR}$ 和 M_* 的方法、选取 SFGs 的方法、IMF 的选择，甚至是星族合成模型的选择不同等均会影响最后的弥散结果。尽管主序关系弥散对质量和红移的依赖性依然存在较大争议，天文学家还是试图探究主序关系弥散的产生机制[46–49]。

首先从理论角度出发讨论对主序关系弥散的认识。Katsianis 等人[46] 在 2019 年利用 EAGLE 数值模拟研究了主序关系的弥散，发现了 $\sigma_{\rm sSFR}$-M_* 的 U 型曲线，并发现最小弥散对应的恒星质量约为 $10^{9.5} M_\odot$。他们认为可能是超新星反馈导致了小质量端的弥散增大，活动星系核反馈导致了大质量区间的弥散增大。Matthee 和Schaye[47]在 2019 年也利用 EAGLE 流体模拟研究恒星形成星系的主序关系，及其弥散的可能起源；他们发现在 $z = 0$ 时，主序关系的弥散随着星系 M_* 的增大而略微变小。他们认为主序关系的弥散来自于短时标 ($0.2 \sim 2$ Ga) 涨落和长时标 (约 10 Ga) 变化的共同作用。其中短时标的涨落与星系形成与演化过程中的气体冷却、恒星形成和气体外流等过程的自我调节息息相关，长时标的变化主要与星系所在暗晕的形成时间的不同有关。同时，他们发现短时标的涨落对于小质量星系更加重要。

当然，从观测的角度出发，也可以研究主序关系弥散的产生原因，如 Saintonge 等人[48]在 2017 年利用 xCOLD GASS 的观测研究星系气体含量的工作中发现，在主序关系上方的星系有更高的气体含量和更短的气体消耗时标，由此可以推断，同一恒星质量区间的星系之所以会有不同的 $\psi_{\rm SFR}$，可能是由于具有不同的气体含量或不同的气体消耗时标。

另外还有天文学家从其他角度出发研究主序关系的弥散，Rodriguez-Puebla 等人[49]认为主序关系的弥散约为 0.3 dex，而同一质量暗晕的吸积率的弥散也约为 0.3 dex，所以认为主序关系的弥散可能是同一质量星系所在暗晕吸积率的弥散导致的，并以此为出发点，结合 SHMR 和暗晕吸积率，得到了星系样本在 $\lg\psi_{\rm SFR}$-$\lg M_*$ 平面的分布，并与主序关系进行对比，试图寻找一致性。

3.2.3 观测结果与理论模型的对比

利用星系形成和演化的理论模型也可以得到主序关系，但是很多研究都发现，在中高红移 ($0.5 < z < 3$)，理论模型中得到的主序关系比观测的主序关系系统地低约 $0.2 \sim 0.5$ dex[16, 35, 50–52]。Sparre 等人[50]在 2015 年发现，对于流体模拟 Illustris，$z = 0$ 和 $z = 4$ 的主序关系与观测比较符合，但是对于中等红移 ($z = 1$ 和 $z = 2$)，Illustris 得到的主序关系明显地低于观测。类似的结果也出现在 Illustris TNG 的模拟结果中，Donnari 等人[35]在 2019 年计算了在不同时间尺度上平均的 $\psi_{\rm SFR}$ 以及不同的空间范围的 $\psi_{\rm SFR}$，发现在

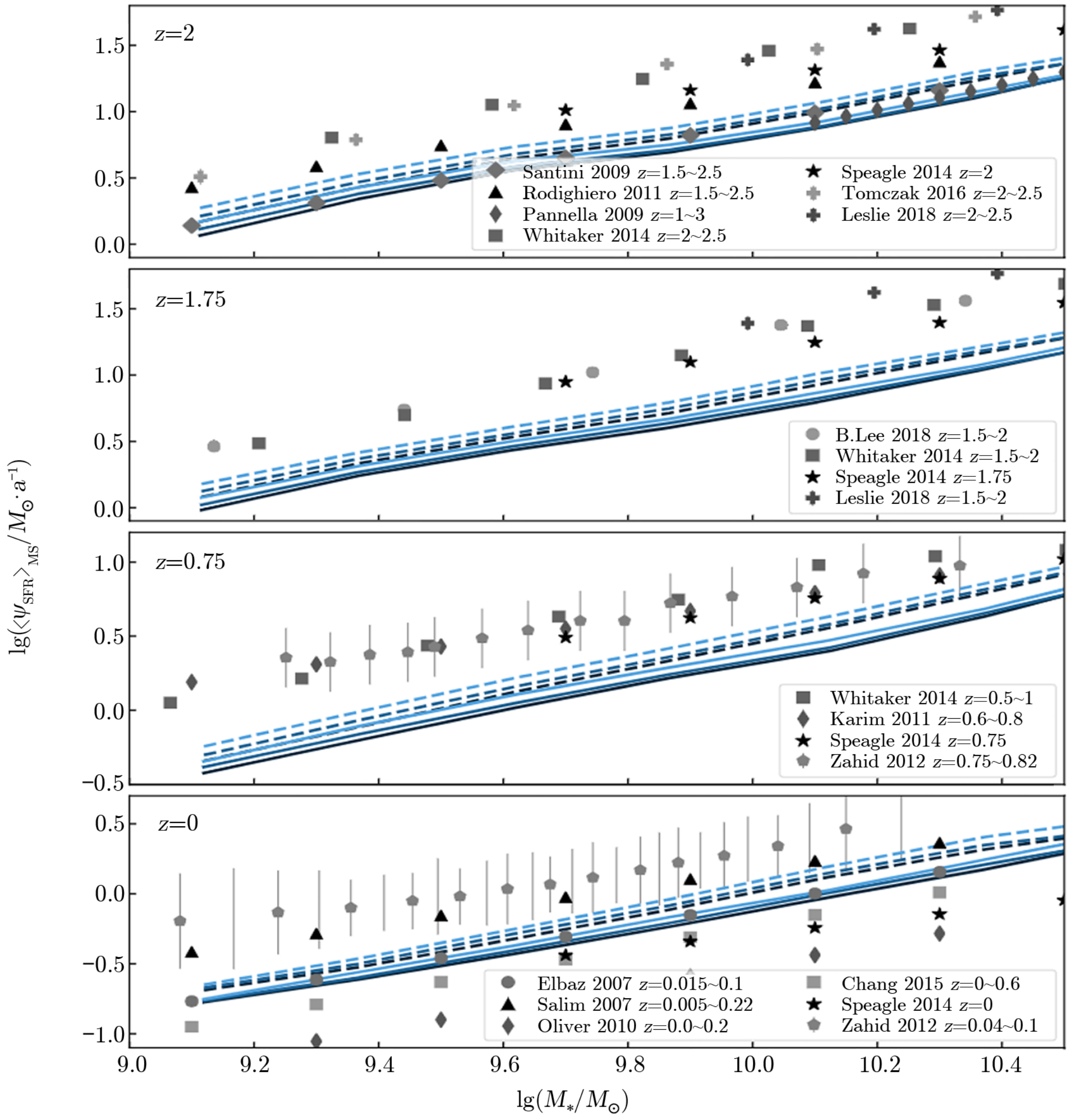
$z = 0$ 时利用不同方法计算的 $\psi_{\rm SFR}$ 均被观测数据包围，说明低红移时理论与观测符合较好；但是在 $z = 0.75$ 和 $z = 1.75$ 时几种计算方法不同的 $\psi_{\rm SFR}$ 都比观测低了约 $0.2 \sim 0.5$ dex，基本全在观测数据的范围外；在更高红移 $z = 2$ 处理论与观测的差距变小了，与部分观测数据相符合，如图 3 所示。Furlong 等人[51]在 2015 年对 EAGLE 流体模拟的探究中，同样发现在 $z = 1$ 和 $z = 2$ 处 SFGs 的 sSFR 比观测明显地低 $0.2 \sim 0.5$ dex，但是主序关系的整体演化趋势是与观测类似的，只不过没有观测到的主序关系演化得更加明显。Tomczak 等人[16]在 2016 年的观测工作中将观测结果与流体模拟 Illustris[53]和半解析模型 L-Galaxies[54]做了比较，发现对于 $M_* \leqslant 10^{10.5} M_\odot$ 的 SFGs，在 $0.5 < z < 2$ 时，观测明显比两个理论模型得到的主序关系高约 0.4 dex；在更高的红移，这个差距变小约为 0.2 dex。Mitchell 等人[52]在 2014 年探究半解析模型 GALFORM 与观测的区别，发现 $0.6 < z < 3$ 时，模拟得到的主序关系明显低于观测。

目前的相关研究工作认为，理论模型和观测得到的主序关系的系统性差别出现的原因主要有两点。一方面可能是目前现有的星系形成和演化的理论模型还存在不足，如 Furlong 等人[51]认为，在 $z \simeq 2$ 主序关系理论结果低于观测结果的现象与星系的恒星质量函数 (GSMF) 理论高于观测的现象，是由相似的物理机制导致的，这个现象意味着目前的星系形成模型在更高红移 ($z > 2$) 需要更强的反馈；再比如最近 Labbe 等人[55]利用 JWST 的最新数据指出，$z > 7$ 的高红移宇宙已经形成的大质量星系比预期高很多，这对当前的星系形成理论提出了挑战，说明我们确实还需要进一步理解星系的恒星形成过程。另一方面是观测数据生成主序关系的过程中系统的不确定性导致，最近有研究认为，如果对理论结果和观测数据进行同样的处理来得到主序关系，将消除这个长久以来存在的问题[56]。同时，Leja 等人[23] 在 2021 年的工作采用了 SED-fitting 的方法得到 $\psi_{\rm SFR}$，并利用了归一化流的方法来生成主序关系，进而得到比前人工作低 $0.2 \sim 0.5$ dex 的主序关系，与理论模型相符。

3.2.4　测量结果的统一

通过上述讨论，我们可以发现，不同的观测工作得到的主序关系在斜率、弥散、零点，以及它们随红移的演化等方面各有不同。正是因为在测定主序关系过程中，引入了很多不同的方法和模型，所以不同的观测结果无法直接进行对比。这直接导致我们无法将不同红移区间的观测整合起来得到样本完备的主序关系。为了解决这个问题，S14 首先做出将标度统一化的尝试，详见 3.1 节。

与 S14 类似，Popesso 等人[24]在 2022 年 (称 P22) 利用 S14 类似的方法对更多的星系样本进行了研究，星系质量范围为 $(10^{8.5} \sim 10^{11.5}) M_\odot$，红移范围为 $0 < z < 6$。他们采用的方法类似 S14，主要区别在于他们把生成主序关系的数据集拓展到在 2014 年之后 20 篇主序关系的观测文章中的 78 个主序关系的观测结果，一共收集到大约 700 个进行过统一校准的数据点，进而得到主序关系及其随时间的演化。相比于 S14，P22 采用的主序关系的很大部分数据都是基于 Herschel far-IR 和 UV 的结合得到的。另外，S14 发现在 $z \simeq 0$ 无法拟合出一个较好的主序关系，所以在最终拟合时，并未曾加入近邻宇宙的数据点。而 Popesso 等人[21]2019 年通过对近邻宇宙数据的讨论，认为近邻宇宙星系的主序关系的弥散与高红移并无不同，所以在 2022 年的工作中加入了近邻宇宙的数据点，对所有的数据点都进行了拟



注：散点是观测结果，如图中的标注；不同颜色和类型的线是 TNG100 得到在不同时间尺度上平均的 $\psi_{\rm SFR}$，以及不同的空间范围的 $\psi_{\rm SFR}$ 所对应的主序关系 (实线代表计算的是 $2R_{\rm star,h}$ 内的 $\psi_{\rm SFR}$；虚线代表计算了所有束缚在本星系的恒星粒子中的 $\psi_{\rm SFR}$；三种颜色由浅入深分别代表的时间尺度为：10 Ma, 50 Ma, 200 Ma)。

图 3　理论与观测的主序关系的对比图[35]

合。另外 P22 中进行统一标度处理的因素有 IMF，$\psi_{\rm SFR}$ 探针，宇宙学参数，未对 SFGs 的挑选方法进行统一校准。

P22 采用了两种方法拟合主序关系。第一种与 S14 类似，致力于寻找最能描述 MS 关系的函数形式，得到的拟合关系是：

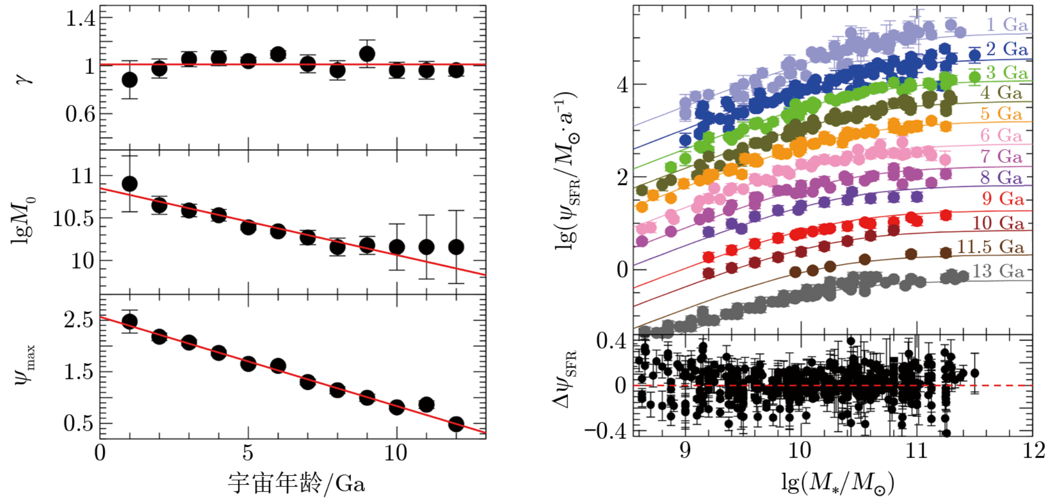
$$\lg\psi_{\rm SFR}(t,\lg M_*)=(a_1t+b_1)\lg M_*+b_2\lg^2 M_*+(b_0+a_0t)\quad, \tag{3}$$

其中，$a_0=0.26\pm0.03$, $a_1=-0.04\pm0.01$, $b_0=-27.58\pm0.05$, $b_1=4.95\pm0.02$, $b_2=-0.20\pm0.02$。与 S14 的最佳拟合不同之处在于二次项 $b_2\lg^2 M_*$，这一项不依赖于时间。主序关系的斜率是由这个二次项和线性项 $(a_1t+b_1)\lg M_*$ 共同主导的，其中二次项导致了主序关系在大质量端的斜率变平现象，拟合的弥散为 0.06 dex。主序关系的幅值随红移的变化为 $\simeq(1+z)^3$。

第二种拟合方法是采用公式 (2) 拟合，通过在不同的时间区间进行拟合，然后发现 $\lg\psi_{\max}$ 和 $\lg M_0$ 都线性依赖于时间，即 $\lg\psi_{\max}(t)=a_0+a_1t$ 和 $\lg M_0(t)=a_2+a_3t$。最终得到的拟合关系为 (见图 4)：

$$\lg\psi_{\rm SFR}(M_*,t)=a_0+a_1t-\lg[1+(M_*/10^{a_2+a_3t})^{-a_4}]\quad, \tag{4}$$

其中，$a_0=2.62\pm0.05$, $a_1=-0.17\pm0.05$, $a_2=10.66\pm0.01$, $a_3=-0.042\pm0.02$, $a_4=0.98\pm0.01$。最佳拟合的弥散是 0.07 dex，说明这种拟合形式也可以对恒星形成星系的主序关系进行很好的拟合。该工作中发现 γ 基本在 1 附近，所以也提供了在 $\gamma=1$ 情况下的拟合结果，此处不再详述。



a)　　　　b)

注：a) 代表了 γ, $\lg M_0$ 和 $\psi_{\max}$ 的最佳拟合值随时间的变化；b) 表示了通过拟合公式 (2) 得到的不同红移/宇宙年龄处的主序关系。

图 4　P22 中拟合公式 (2) 得到的主序关系[24]

4 总结与展望

最近 10 年，随着观测设备和数据处理技术的不断发展，以及星系形成理论模拟的不断完善，恒星形成星系主序关系的相关研究取得了许多重要进展。

对于主序关系在大质量端形状的争议，早期的研究一般认为主序关系的斜率并不随星系的恒星质量发生变化，而近期的大部分工作则倾向于认为主序关系在大质量端会变平 (即斜率变小)，并且认为斜率开始发生变化所对应的恒星质量 M_0 随着红移的增大而增大。对于此现象的解释也在 10 年之内经历了很多变化，由最开始的归因于 SFGs 内部的核球增长，到目前的归因于星系/暗晕冷热吸积模式发生转换导致冷吸积减少。当然还有测定主序关系的过程中涉及到不同方法的因素。

由于不同研究中得到主序关系的过程及主序关系的定义方法不同，主序关系的弥散研究变得很困难，但目前观测上基本认为主序关系的弥散为 $0.2 \sim 0.4$ dex。近期的研究发现，主序关系的弥散对恒星质量的依赖呈现 U 型，并认为小质量端的较大弥散主要由恒星反馈贡献，大质量端的较大弥散由活动星系核反馈贡献。另外，依赖于理论数值模拟，有些研究认为除了由于观测的不确定性引入的一部分弥散，另一部分弥散来自与星系形成具体过程相关的短时标 ($0.2 \sim 2$ Ga) 涨落和与暗晕增长相关的长时标 (约 10 Ga) 变化的共同作用。观测上同时发现主序关系的弥散可能与分子气体的含量与消耗时标有关，即处在主序关系上方的星系气体含量较多，气体消耗时标较短。

对于长期以来一直存在的中高红移 ($0.5 < z < 3$) 时理论比观测结果的主序关系低 $0.2 \sim 0.5$ dex 的现象，无论是流体模拟还是半解析模型，都得到相似的结论。一些研究发现，如果统一观测和理论生成主序关系的方法，可能会消除这个问题。当然，目前的星系形成和演化的理论模型还需要进一步完善，针对此原因，可以修改星系形成模型，如有些研究建议提高更高红移的恒星反馈，以增加中红移 (如 $z = 1 \sim 2$) 的气体含量，进而提高该时刻的 $\psi_{\rm SFR}$。但是未来也需要考虑到借助该红移处的气体观测来限制星系形成模型。同时还需要考虑整体恒星质量函数的演化与观测的对比。总之，理论模型上的改进并非那么容易。

针对测定主序关系过程中涉及到的方法不同会对最终结果造成影响这个问题，S14 和 P22 两个工作对不同的观测数据进行统一校准，尽量减少由于方法不同造成的系统性误差。但是由于无法精确估计某些因素对确定 $\psi_{\rm SFR}$ 和 M_* 的定量影响，所以并未对所有因素进行统一方法的校准。

尽管主序关系的研究已经取得很多重要进展，仍然需要不断深入研究，尤其是在观测上。目前中红外观测设备 JWST 已经成功发射并获得了首批数据，这对于我们研究高红移星系具有重要的意义。随着观测设备的日趋完善，$\psi_{\rm SFR}$ 和 M_* 的测量精度也会逐渐提高。除此之外，利用观测数据得到主序关系的过程中最好采用同样的方法，使得不同的观测结果可以直接进行比较。观测上得到更加精确和相似的主序关系不仅可以更好地刻画主序关系本身的性质，还可以对星系形成和演化的理论模型加以限制。另外，需要考虑对主序关系会产生间接影响的观测，如对于中高红移处气体的观测，以及冷热吸积模式转换的观测等。

参考文献：

[1] Noeske K G, Weiner B J, Faber S M, et al. ApJ, 2007, 660: L43
[2] Elbaz D, Daddi E, Le Borgne D, et al. A&A, 2007, 468: 33
[3] Daddi E, Dickinson M, Morrison G, et al. ApJ, 2007, 670: 156
[4] Santini P, Fontana A, Grazian, A, et al. A&A, 2009, 504: 751
[5] Oliver S, Frost M, Farrah D, et al. MNRAS, 2010, 405: 2279
[6] Peng Y J, Lilly S J, Kovač K, et al. ApJ, 2010, 721: 193
[7] Karim A, Schinnerer E, Martínez-Sansigre A, et al. ApJ, 2011, 730: 61
[8] Whitaker K E, van Dokkum P G, Brammer G, et al. ApJ, 2012, 754: L29
[9] Sobral D, Best P N, Smail I, et al. MNRAS, 2014, 437: 3516
[10] Rodighiero G, Renzini A, Daddi E, et al. MNRAS, 2014, 443: 19
[11] Speagle J S, Steinhardt C L, Capak P L, et al. ApJS, 2014, 214: 15
[12] Whitaker K E, Franx M, Leja J, et al. ApJ, 2014, 795: 104
[13] Renzini A, Peng Y J. ApJ, 2015, 801: L29
[14] Schreiber C, Pannella M, Elbaz D, et al. A&A, 2015, 575: A74
[15] Lee N, Sanders D B, Casey C M, et al. ApJ, 2015, 801: 80
[16] Tomczak A R, Quadri R F, Tran K V H, et al. ApJ, 2016, 817: 118
[17] Kurczynski P, Gawiser E, Acquaviva V, et al. ApJ, 2016, 820: 1
[18] Santini P, Fontana A, Castellano M, et al. ApJ, 2017, 847: 76
[19] Pearson W J, Wang L, Hurley P D, et al. A&A, 2018, 615: A146
[20] Popesso P, Concas A, Morselli L, et al. MNRAS, 2019, 483: 3213
[21] Popesso P, Morselli L, Concas A, et al. MNRAS, 2019, 490: 5285
[22] Sherman S, Jogee S, Florez J, et al. MNRAS, 2021, 505: 947
[23] Leja J, Speagle J S, Ting Y S, et al. arXiv e-prints, 2021, arXiv:2110.04314
[24] Popesso P, Concas A, Cresci G, et al. arXiv e-prints, 2022, arXiv:2203.10487
[25] 高宇翔, 郭可欣, 郑宪忠. 天文学进展, 2015, 33: 159
[26] Katsianis A, Yang X H, Zheng X Z. ApJ, 2021, 919: 88
[27] Kennicutt R C, Evans N J. ARA&A, 2012, 50: 531
[28] Osterbrock D E, Ferland G J. Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei, Sausalito, University Science Books, 2006: 1
[29] Lutz D. ARA&A, 2014, 52: 373
[30] Bruzual G, Charlot S. MNRAS, 2003, 344: 1000
[31] Daddi E, Cimatti A, Renzini A, et al. ApJ, 2004, 617: 746
[32] Abramson L E, Kelson D D, Dressler A, et al. ApJ, 2014, 785: L36
[33] Whitaker K E, Franx M, Bezanson R, et al. ApJ, 2015, 811: L12
[34] Daddi E, Delvecchio I, Dimauro P, et al. arXiv e-prints, 2022, arXiv:2203.10880
[35] Donnari M, Pillepich A, Nelson D, et al. MNRAS, 2019, 485: 4817
[36] Schreiber C, Elbaz D, Pannella M, et al. A&A, 2016, 589: A35
[37] Delvecchio I, Daddi E, Sargent M T, et al. A&A, 2021, 647: A123
[38] Daddi E, Rich R M, Valentino F, et al. ApJ, 2022, 926: L21
[39] Behroozi P, Wechsler R H, Hearin A P, et al. MNRAS, 2019, 488: 3143
[40] Dekel A, Birnboim Y. MNRAS, 2006, 368: 2
[41] Rodighiero G, Cimatti A, Gruppioni C, et al. A&A, 2010, 518: 25
[42] Guo K X, Zheng X Z, Fu H. ApJ, 2013, 778: 23
[43] Boogaard L A, Brinchmann J, Bouché N, et al. A&A, 2018, 619: 27
[44] Willett K W, Schawinski K, Simmons B D, et al. MNRAS, 2015, 449: 820
[45] Davies L J M, Thorne J E, Bellstedt S, et al. MNRAS, 2022, 509: 4392
[46] Katsianis A, Zheng X Z, Gonzalez V, et al. ApJ, 2019, 879: 11

[47] Matthee J, Schaye J. MNRAS, 2019, 484: 915
[48] Saintonge A, Catinella B, Tacconi L J, et al. ApJS, 2017, 233: 22
[49] Rodríguez-Puebla A, Primack J R, Behroozi P, et al. MNRAS, 2016, 455: 2592
[50] Sparre M, Hayward C C, Springel V, et al. MNRAS, 2015, 447: 3548
[51] Furlong M, Bower R G, Theuns T, et al. MNRAS, 2015, 450: 4486
[52] Mitchell P D, Lacey C G, Cole S, et al. MNRAS, 2014, 444: 2637
[53] Nelson D, Pillepich A, Genel S, et al. Astronomy and Computing, 2015, 13: 12
[54] Henriques B M B, White S D M, Thomas P A, et al. MNRAS, 2015, 451: 2663
[55] Labbe I, van Dokkum P, Nelson E, et al. arXiv e-prints, 2022, arXiv:2207.12446
[56] Katsianis A, Gonzalez V, Barrientos D, et al. MNRAS, 2020, 492: 5592

Research Progress of the Star-Forming Main Sequence

CHEN Yao-xin[1], KANG Xi[1,2]

(1. Institute for Astronomy, School of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Science, Nanjing 210034, China)

Abstract: Observations have found that for star-forming galaxies (SFGs) there is a relatively tight relation between star formation rate ($\psi_{\rm SFR}$) and stellar mass (M_*) (i.e. $\lg\psi_{\rm SFR}$-$\lg M_*$, known as main sequence), with a typical scatter of $0.2\sim0.4$ dex. The main sequence plays an important role in constraining theoretical models of galaxy evolution and is one of the basic relations describing the evolution of galaxies. Recent years we have witnessed great progress in both observational and theoretical work on the main sequence and its evolution. Firstly, the key steps involved in the process of obtaining the main sequence are introduced, focusing on the method of measuring $\psi_{\rm SFR}$ of galaxy and the method of selecting the SFGs from the complete sample of galaxies. Using different methods causes systematic deviations between the obtained main sequence. Then the main issues and progress on the studies of the main sequence are presented. The main sequence shows a bending at massive end with respect to the slope obtained in the low-mass end. There are mainly two explanations for bending, including the formation of a bulge component in SFGs and the lessening of cold-accretion. The relation between the scatter of main sequence and the stellar mass ($\sigma_{\rm SFR}$-M_*) shows the characteristic of U-shape. This may indicate that supernovae feedback increases the scatter at low-mass end and active galactic nuclei feedback is important for increasing the scatter at massive end. In addition, in the mid- and high-redshift, the normalization of the main sequence obtained by theory is always lower than the observational result by $0.2\sim0.5$ dex. So far, this problem has not been effectively solved. The high-redshift SFGs data from JWST can help us understand main sequence more comprehensively.

Key words: star-forming galaxies; main sequence; galaxy formation; galaxy evolution